

文章编号 1005-0388(2001)04-0464-04

利用可见性概念改进基于镜像原理的射线追踪法^{*}

顾晓龙 章文勋 云正清 金祯荣

(毫米波国家重点实验室 东南大学, 江苏 南京 210096)

摘要 研究改进了基于镜像原理的反射线追踪算法。将镜像点用树的结点形式作拓扑表示,再建立判据去除无效的像点,从而极大提高了计算效率。并举例说明了该判据的有效性。

关键词 传播模化 几何光学法 镜像法 射线追踪

中国分类号 TN 011.2

文献标识码 A

Improved ray-tracing technique with image approach based on visibility between objects

GU Xiao-long ZHANG Wen-xun YUN Zheng-qing JIN Zhen-rong

(State Key Lab. of Millimeter Waves, Southeast University, Nanning Jiangsu 210096, China)

Abstract In this paper, the ray-tracing technique with image approach is studied and improved. The images are topologically represented as nodes in a tree, then two improved criteria are founded for filtering the invalid images, thus they can greatly increase the efficiency in ray-tracing. Two examples of discovering the validity of these criteria is presented.

Key words propagation modeling geometrical optical method image method ray-tracing

1 引言

几何光学法是求解高频电磁场问题的常用方法,它通过到达场点的射线来计算该点的场强。其确定射线路径的方法称为射线寻迹或射线追踪。从发射天线所在的源点到达指定的场点可能存在众多的射线,本文主要研究这些射线的追踪方法及其改进。

Tan 于 1993 年提出基于镜像原理的射线追踪法^[1,2](简称 IMG 法),比以往的射线追踪法(如 SBR 法^[3])效率更高,且更精确。在 IMG 法中,镜像点可以系统地表示成树的拓扑形式,射线追踪的过程则对应于树的遍历。

在图 1 中,圆圈是树的结点,代表了各层镜像点,圆圈里的数字是产生像点的反射面的编号;源

点用 s 表示,反射面用 m 表示, s 关于 m 的镜像点用 $s(m)$ 表示。

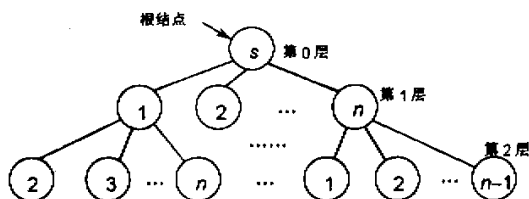


图 1 像点的树表示

设有 n 个反射面编号为 $1, 2, \dots, n$,若不考虑相互之间的遮挡,则源点对每个反射面各产生一个直接镜像,统称为第一层像点,共有 n 个,这些镜像点

又分别对诸反射面产生新的镜像点,统称第二层像点。虽然第一层的每个像点 $s(m)$ 也对应 n 个二次像点,但有一个与 s 重合的像点并不需要考虑,因此第二层像点共有 $n \times (n-1)$ 个。第二层的每个像点又产生 $n \times (n-1) \times (n-1)$ 个第三层像点,……以此类推, l 层的像点树的像点总数(不包括 s)为

$$K(l,n) = \sum_{i=1}^l n \times (n-1)^{i-1}$$
$$= \begin{cases} \frac{n \times (n-1)^l - n}{n-2} & (n \neq 2) \\ n \times l & (n = 2) \end{cases} \quad (1)$$

实际情况下,镜像数目随层数成幂数律急剧增加,往往多得惊人,以至计算非常困难。而另一方面,由于物体间的遮挡,其中相当多数的镜像对场点并无贡献,成为无效像点。因此在较复杂反射环境中应用 IMG 法的关键是:既要不遗漏一切可能的镜像点、又要筛除所有无效像点。这正是本文所要解决的问题。

2 物体间可见性的引入和无效反射线的判据

如果一个像点不产生后继像点,就可在像点树上去除它与其后继像点之间的路径,于是与该路径连结的所有后代结点也都可去除,使像点树得以简化。为此引入物体间可见性的概念^[4,5]以及建立无效反射线的判据,有效地减少像点树的结点数目,进而减少可能的反射线数目,可显著提高计算效率。

可见性定义为:

- (1)如果相异两点 P 和 Q 之间的连线不与任何物体相交,则称点 P 和 Q 是可见的;
- (2)如果在某线段(表面)上存在相异于 P 的一点 Q ,使得 P 和 Q 可见,则称点 P 和该线段(表面)是可见的;
- (3)如果在一线段(表面)上存在一个点 P ,使得 P 和另一线段(表面)可见,则称该两线段(表面)之间是可见的。

根据可见性的定义可以引出下列三个适用于三维空间环境中的反射线有效性的判据^[4,5]。

判据 I 对于像点树中具有直接前、后代关系的两个结点,如果它们所对应的两个反射面是不可见的,则它们之间的路径应当去除。

判据 II 如果在像点树的第一层结点(即根结点的直接后代)中存在这样的结点,它们所对应的反射面与发射天线之间为不可见,则该结点与根结点之间的路径应当去除。

为了便于判据 III 的叙述,先定义源反射面。如果经过某个反射面的反射射线有可能到达另一个反射面,则前者称为后者的源反射面。

判据 III 若像点树中有某个结点 m_1 对应其直接后代的结点 m_2 ,而 m_1 所代表的反射面不是 m_2 代表的反射面的源反射面,则它们之间的路径也应当去除。

利用这三个判据可以消除大量无效像点,显著提高运算效率。下面示例说明上述判据的效果。

例:判别图 2 所示街区中的有效射线。设街道两边的建筑物都具有平整反射表面。 T 和 R 分别为发射天线和接收天线的位置。

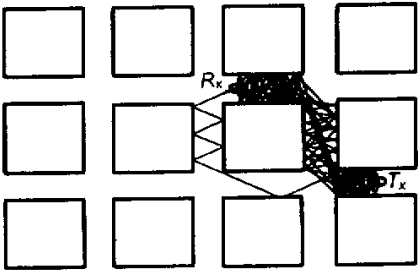


图 2 街区图:11 条反射线,反射次数 ≤ 20

表 1 列出了使用不同判据的结果,表中,“无限制”表示未用判据时的射线数,而由式(1)所得的结果;“限制 1”表示运用了判据 I;“限制 2”表示运用了判据 I 和 II;“限制 3”表示运用了判据 I、II 和 III。

表 1 图 3 所示街区的射线数

反射次数 n	追踪射线数				有效射线数
	无限制	限制 1	限制 2	限制 3	
3	108336	443	103	39	0
4	5091840	4091	501	99	0
5	2.4×10^8	37877	2555	217	1
6	1.1×10^{10}	328377	11601	431	3
7	5.3×10^{11}	2883742	55802	795	5
8	2.5×10^{13}	—	251665	1384	5
9	1.2×10^{15}	—	—	2298	5
11	2.6×10^{18}	—	—	5661	7
13	5.7×10^{21}	—	—	12405	10
20	2.9×10^{33}	—	—	106131	11

可见,运用判据的结果消除了大量无效射线,可明显节省计算时间。

3 像点树的简化和改进判据

上列三个判据作为不存在后继像点的充分条件,仅是存在后继像点的必要而非充分条件。因此,还可能进一步减少像点树上的结点数。

首先引入有效反射面的概念^[6]。在本文中,‘平面’是无限的,没有边界的;‘反射面’是平面的一部分,其面积是有限的,是实际物体表面的理想化;而‘有效反射面’则是反射面上被射线照射到的、起反射作用的部分。

设有 N 个反射面 m_1, m_2, \dots, m_N , 则有效反射面可定义如下:

3.1 已知像点树的第一层结点所对应的像点 I 就是源点 S 经过面 m_i 的反射所产生的像点。若由于 S 与 m_i 之间可能存在其它面的遮挡,从 S 发出的射线仅照在 m_i 的一部分 m'_i 上,则 m'_i 即称为 m_i 的有效反射面;

3.2 若 m'_i 是像点 I 的有效反射面,而由 I 发出途径 m_i 与 m_j 之间其它面的遮挡后 m'_i 在 m_j 上的投影为 m'_j ,则 m'_j 就是像点 I 经由面 m_j 反射所产生的后继像点的有效反射面。反射面的反射线能到达的空间区域则称为镜像的照射区。图 3 所示面 m_j 上的 CGFE 部分由于面 m_k 的遮挡而应排除在有效反射面 m'_j 之外。

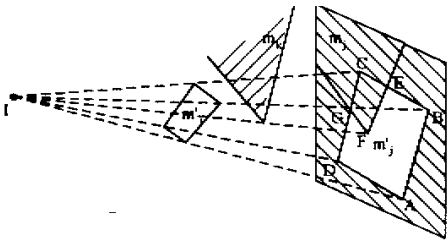


图 3 有效反射面

改进判据 I 如按上面的方法求得的有效反射面积 m' 为空,则该像点是无效像点。

这种方法实际上是对原三条判据的扩充。按原来的判据,每一个像点是否有效只根据上两级反射面的情况确定;此改进判据却是利用以前所有反射面的位置和形状来判断,它是像点存在的充分必要条件。因此,采用本判据就不必再用原三条判据。虽然这些像点未必和接收天线可见,但它们所发出的

射线可能再经过若干次反射后到达接收天线,所以都必须保留在像点树上。

改进判据 II 用改进判据 I 后仍保留在像点树上的点是有效像点,若接收天线处于某有效像点的照射区里,则该像点一定存在有效反射线。该判据的反述也成立,即该条件也是判断有效反射线的充分必要条件。

显而易见,一条射线为有效反射线等价于下面两个条件:(1)该射线在行进途中不被遮挡,(2)所有反射点都存在于(实际)反射面上。可以证明,改进判据 II 与这两个条件也是等价的。

改进判据 I 不依赖于场点的位置,可用作建立像点树时的判断依据;而改进判据 II 还要求知道接收天线(场点)的位置,在计算场强时它可作为判断反射线有效性的依据。

4 判据应用的实例

矩形截面的直隧道模型如图 4 所示,其截面尺寸为宽 $a \times$ 高 b ,取直角坐标系。设发射天线位于 $S(x_0, y_0, 0)$ 点。它的各个反射面都是相互可见的,所以原判据的判据 I、判据 II 肯定满足,但判据 III 仍有效。例如镜像树上第三层的镜像点 $S_{(1,2,4)}$ 与 $S_{(1,2,1)}$ 的上层像点 $S_{(1,2)}$ 所发出的射线所能达到的范围如图 5 中 ADE 内,到不了反射面 m_4 和 m_1 。所以 m_2 不是 m_4 或 m_1 的源反射面。由判据 III, $S_{(1,2,4)}$ 与 $S_{(1,2,1)}$ 都可从镜像树上去除, $S_{(1,2)}$ 的后继像点仅 $S_{(1,2,3)}$ 一个(见图 5、6)。

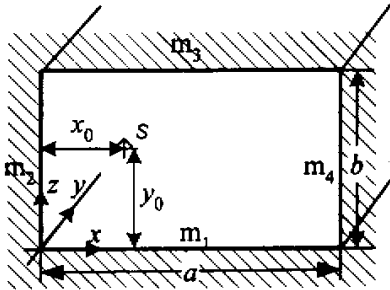


图 4 矩形截面直隧道

对 $S_{(1,2,3)}$ 的后继像点 $S_{(1,2,3,4)}$,由 $S_{(1,2)}$ 发出的射线经 m_3 反射可以到达反射面 m_4 ,所以根据判据 III 尚不能判断 $S_{(1,2,3,4)}$ 是否有效的。 $S_{(1,2)}$ 对应的有效反射面为 m_2 的 AD 段, $S_{(1,2,3)}$ 对应的有效反射面为 m_3 的 DE 段, $S_{(1,2,3,4)}$ 对应的有效反射面为空,所以根据改进判据 I,像点 $S_{(1,2,3,4)}$ 也是无效的($S_{(1,2,3)}$ 的有效

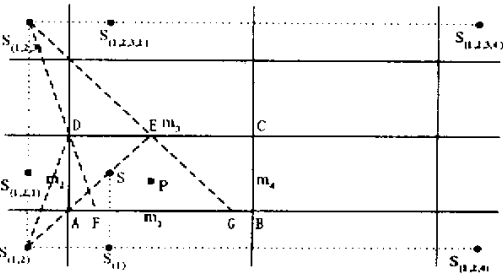


图 5 隧道中的镜像

后继像点也只有一个 $S_{(1,2,3,1)}$,图 5 中没有画出)。

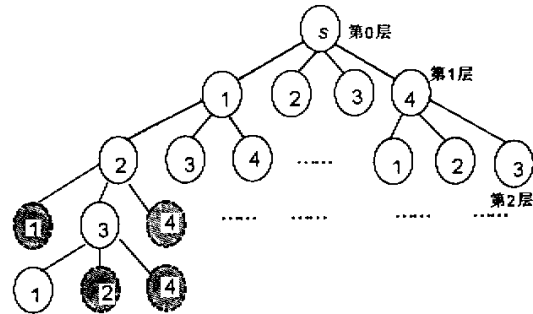


图 6 图 4 所示隧道像点树

使用改进判据 I 的效果如表 2 所示,它进一步减少了需要计算的像点数,尤其在计算阶数比较高时更加明显。从表中的结果看,这时计算的复杂度大致为立方阶。

表 2 图 4 所示隧道的射线数

反射次数 N	追踪射线数			有效射线数
	用改进判据 I	用判据 III	不用判据	
1	5	5	5	5
2	17	17	17	13
3	41	41	53	25
4	81	85	161	40
5	141	161	485	59
7	337	501	4373	111
9	661	1417	39365	178
11	1145	3841	354293	259
13	1821	10213	3188645	358
16	3255	43637	86093441	533
19	5295	185301	2.32×10^9	747

表中有效射线数是指从像点到场点的直接射线,使用改进判据 I 后得到的像点树上的每一个像点还不一定存在有效射线,还要用有效反射线的充要条件判断像点是否存在有效射线。但不可以把无有效射线的像点从像点树上删除,因为它的后代像点可能存在有效射线,也即它发出的射线可能会在若干次反射后到达场点。如图 5 中的像点 $S_{(1,2)}$ 无可能到达 P 点的有效射线,但经反射面 m_3 反射后(也即像点 $S_{(1,2,3)}$ 发出的射线)可到达 P 点(P 点在区域 $DEGF$ 内)。另外一点是使用改进判据 I 后得到的像点树与场点位置无关,对计算不同位置的场强,只需建立一次镜像树。

5 结论

从上述分析可以看出,即使是矩形直隧道这样的简单结构,未判断像点有效性的像点树上也存在大量的无效像点,而有效性判据可以显著减少像点数,提高计算速度。像点无效的原因主要是由于其它物体的遮挡,所以对于越复杂的环境,遮挡的因素越多,判据也就越有效。改进判据最大程度地减化了像点树。由该判据很容易判断有效射线是否存在,由此编写出射线追踪程序。

参考文献

[1] Y. Tan. H. S. Tan. UTD propagation model in an urban street scene for micro-cellular communications [J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1993,35(4):423~428.

[2] Y. Tan. H. S. Tan. A theory for propagation path-loss characteristics in a city-street grid [J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1995, 37 (3): 333 ~ 342.

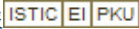
[3] H. Ling, R. C. Chou, S. W. Lee. Shooting and bouncing rays; calculating the RCS of an arbitrary shaped cavity [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1989, 37(2):194~205.

[4] 云正清. 射线追踪法研究和在微小区传播预估中的应用[R]. 东南大学博士后研究报告,1996.

[5] Zheng-Qing YUN, Wen-Xun ZHANG. An efficient ray tracing technique for microcellular propagation modeling using the image approach [C]. Proc. of Int. Symp. Antennas & Propagation 1996, Chiba, Japan, : 1093 ~1096.

[6] 顾晓龙. 射线追踪法及其在隧道传播场强预测中的应用研究 [D]. 东南大学硕士学位论文,2001.

利用可见性概念改进基于镜像原理的射线追踪法

作者: 顾晓龙, 章文勋, 云正清, 金祯荣
作者单位: 毫米波国家重点实验室, 东南大学, 江苏, 南京, 210096
刊名: 电波科学学报 
英文刊名: CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE
年, 卷(期): 2001, 16(4)
被引用次数: 6次

参考文献(6条)

1. Y Tan; H. S. Tan [UTD propagation model in an urban street scene for micro-cellular communications](#) [外文期刊] 1993(04)
2. Y Tan; H. S. Tan [A theory for propagation path-loss characteristics in a city-street grid](#) [外文期刊] 1995(03)
3. H Ling; R. C. Chou; S. W. Lee [Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrary shaped cavity](#) [外文期刊] 1989(02)
4. 云正清 [射线追踪法研究和在微小区传播预估中的应用](#) 1996
5. Zheng-Qing YUN; Wen-Xun ZHANG [An efficient ray tracing technique for microcellular propagation modeling using the image approach](#) 1996
6. 顾晓龙 [射线追踪法及其在隧道传播场强预测中的应用研究](#) [学位论文] 2001

本文读者也读过(7条)

1. 宋红兵 [一种基于城市环境的新型的源定位方法](#) [学位论文] 2010
2. 黄沛霖. 王钢林. 武哲 [以捷径法提高射线追踪效率](#) [期刊论文] - [北京航空航天大学学报](#) 2004, 30(5)
3. 宋红兵. 王浩刚 [一种新型的城市环境下任意目标源三维定位方法](#) [会议论文] - 2009
4. 陈娜. 杨会明. 薄亚明 [任意极化电波多平面反射传播的射线追踪法](#) [会议论文] - 2008
5. 蔡鑫伦. 黄德修. 张新亮. Cai Xin-Lun. Huang De-Xiu. Zhang Xin-Liang [基于全矢量模式匹配法的三维弯曲波导本征模式计算](#) [期刊论文] - [物理学报](#) 2007, 56(4)
6. 袁珍. 陈泓 [使用射线追踪法研究天线极化对室内场强的影响](#) [期刊论文] - [广东通信技术](#) 2008, 28(3)
7. 陈娜 [三维环境任意极化波射线追踪法的研究与实现](#) [学位论文] 2009

引证文献(6条)

1. 廖斌. 赵昵丽. 朱守正 [基于虚拟源树的射线跟踪算法的研究](#) [期刊论文] - [华东师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)
2. 王祖良. 樊文生. 郑林华 [海面电波传播损耗模型研究与仿真](#) [期刊论文] - [电波科学学报](#) 2008(6)
3. 曹星. 贾坤. 朱银川. 雷凯涛 [微蜂窝中电波传播预测模型的改进](#) [期刊论文] - [电讯技术](#) 2004(1)
4. 王利东. 李朝奎. 陶建军. 杨刚 [基于.NET Remoting的射线跟踪并行计算模型](#) [期刊论文] - [计算机应用](#) 2011(10)
5. 熊泽明 [射线跟踪法在室内WLAN环境的电波传播预测研究](#) [学位论文] 硕士 2004
6. 陈惠玲 [用于城市微小区电波传播预测的室外射线跟踪模型](#) [学位论文] 硕士 2005